视觉工作记忆的过滤效能*

张照 [1,2] 张力为 [1] 龚然 [1,3]

[1](北京体育大学心理学院，北京 100084)

[2](成都体育学院体育教育训练三系，成都 610041)

[3](中国民航大学乘务学院，天津 300300)

摘要：过滤效能反映了视觉工作记忆的干扰抑制功能，研究者可基于储存容量或表征精度对其进行测量，其神经加工过程主要分为觉察分心项目、过滤启动、实现过滤或储存，涉及前额叶皮层和基底核、后顶叶皮层的协同作用。过滤效能的变化方向受到年龄、特殊障碍、情绪、认知特点等因素的影响。未来研究仍需解决的问题包括厘清过滤效能与工作记忆容量的关系，辨明过滤效能的心理实现过程，探索不同年龄、特殊障碍和职业等群体过滤效能的脑机制以及提升基础研究范式的生态学效度。

关键词：过滤效能，视觉工作记忆，神经机制，变化特点

分类号：B842

引言

世界卫生组织(World Health Organization, WHO)提供的数据显示，每年全世界大约有 135 万人的生命因道路交通事故而终止，还有 2000 万至 5000 万人受到非致命伤害，其中许多人因此而残疾(世界卫生组织, 2018)。机动车驾驶员的主观因素是造成交通事故的主要原因，如认知、反应、判断等(张宁宁, 2012)，其中危险驾驶行为与高级认知功能——工作记忆密切相关(Ge et al., 2020)。可见，工作记忆对个体的日常生活至关重要，甚至生死攸关。

工作记忆(working memory, WM)可以短暂地储存和控制外界信息，以实现目标导向的行为(库逸轩, 2019)。但有限的工作记忆容量(working memory capacity, WMC)要求个体建立高效的信息选择机制，纳入与任务高度相关的信息，并避免因无关信息的干扰而造成的容量浪费。研究者(Vogel et al., 2005)将这种信息选择能力称为过滤效能(filtering efficiency, FE，也有研究称 filtering ability)，即选择与任务有关的目标信息并过滤与任务无关的分心信息的能力，属于视觉工作记忆(visual working memory, VWM)在信息储存过程中的干扰抑制机制，这种机制

收稿日期：2020-04-29

* 国家重点研发计划《冬季运动项目心理调控关键技术的研究》(2019YFF0301605)

通讯作者：张力为, E-mail: liweizhang@hotmail.com

主要体现在对视觉信息储存的加工处理阶段。Cowan 等(2006)认为，FE 本质上是注意控制的选择性功能在 VWM 中的体现。

综合来看，WMC 和 FE 存在密切联系，但分别代表了 VWM 的信息储存能力和对无关信息的加工处理能力。研究表明，个体的 WMC 可以反映认知水平，而 FE 能够正向预测 WMC(Luck & Vogel, 2013; McNab & Klingberg, 2008)。因此，有观点认为，比起 WMC，FE 似乎对工作记忆绩效(working memory performance)的促进效果更为明显。另外，现有研究较多关注 WMC，对 FE 的讨论尚在探索阶段。笔者认为有必要对该主题的相关文献进行系统梳理与总结，为推进该领域的研究提供新思路。具体而言，本文将首先从介绍 FE 的发生机制入手，接着基于加工阶段和相关脑区探讨其中的神经机制，然后分析 FE 的变化特点及其影响因素，最终就未来研究仍需解决的问题提出进一步的研究建议。

1 基于储存容量和表征精度的过滤效能

1.1 工作记忆的储存容量和表征精度

比起拥有近乎无限容量的长时记忆，工作记忆的储存容量则极为有限。从 7±2(Miller, 1956)到 4(Cowan, 2001)，有限的容量限制了个体的信息加工和处理能力。由于储存容量的大小与个体的流体智力和一般认知表现密切相关(Johnson et al., 2013)，因此，VWM 的容量及其信息储存机制一直是本领域的研究热点。

除了储存容量，研究者近年来开始关注基于颜色回忆任务(color recall task, CRT)(Zhang & Luck, 2008)测得的表征精度，即客体的特征被表征在工作记忆中的精确程度。由于工作记忆资源的有限性，导致每个客体的表征精度也是有限的(Ma et al., 2014)。研究者通过比较研究参与者回忆的色块颜色和实际色块颜色的差异，然后推算出表征精度。目前，表征精度已成为评价 VWM 的新指标，与储存容量一起分别从“质”和“量”的角度为研究者评价 VWM 提供更为准确、全面的依据。

针对有限的工作记忆资源如何分配给储存容量和表征精度的问题，研究者提出了“插槽”模型、灵活资源模型以及整合这两个模型的插槽–资源模型(何旭, 郭春彦, 2013)。“插槽”模型认为储存容量是固定的（3~4 个），如果信息数量较多，WM 只能选择对少数客体进行精确表征，并忽略其余客体信息。灵活资源模型则认为资源可以灵活分配：个体既可以储存少数表征精度较高的客体，也可以储存多个表征精度较低的客体。上述两个模型均有实验证据的支持。近年来，有两批研究者(Fougnie et al., 2012; van den Berg et al., 2012)几乎同时提

出了变化精度资源模型(variable precision resource model，亦可简写为 VP model)，该模型认为个体的心理资源在实验的每个试次上都可能发生变化，并可随机分配到刺激项目上，导致不同的表征精度。有研究支持了该模型(Pratte et al., 2017; van den Berg et al., 2014)，并认为该模型对行为结果的拟合效果最好。

关于哪个模型能更好地衡量储存容量和表征精度的争论仍在继续(库逸轩，2019)，基于此，研究者分别从容量和精度的角度对 FE 进行测量，尝试理解 FE 的发生机制。这样一方面可从理论角度推动现有模型争议的解决，一方面为实践中通过认知训练提升 VWM 的过滤能力提供依据和指导。

1.2 基于储存容量的过滤效能

Vogel 等(2005)最早使用包含分心项目的变化觉察任务(change detection task, CDT)来测量 FE。程序如下：屏幕中央会出现一个“十”字注视点，在注视点上方出现提示线索（一般为向左或向右的箭头，表示接下来的注意方向），持续 200ms；接着出现记忆序列(memory array)，此时在注视点的左右两侧同时呈现数量相等的记忆刺激，要求研究参与者盯住屏幕中央，并仅记忆提示箭头所指向那一侧的刺激，记忆序列的呈现时间为 100~200ms；空屏(retention interval，只保留“十”字注视点)900ms 后出现测试序列(test array)，此时需要判断出现的探测刺激(probe)相比记忆序列中的刺激是否发生了变化（判断标准有刺激的颜色、朝向和位置等），再按键做出是/否的反应，试次结束，整个过程持续约 1200ms。实验的刺激有两大类，一类是目标项目(targets, T)，另一类是分心项目(distractors, D)，均以几何图形（三角形、矩形和圆等）的形式呈现。实验条件一般根据刺激类型和数量的组合分为 3 个或多个水平，常见的划分方式：(1)n 个 T，无 D；(2)2n 个 T，无 D；(3)n 个 T 和 n 个 D。例如，一组划分为 3 个水平的目标和分心项目的组合可以是 2T/4T/2T2D，即 2 个目标项目、4 个目标项目、2 个目标和分心项目。

研究者通过比较研究参与者在上述 3 个水平下的储存容量，从而间接对 FE 做出测量与评价，包括行为和神经生理层面的测量。

1.2.1 行为测量

研究者一般使用过滤效能分数(filtering efficiency score)来评价 FE，其计算分两步进行：

第一步，计算 WMC。根据具体的实验设计选择公式$K = S * (H - F)$(Cowan, 2001)或公式$K = N * \frac{H-F}{1-F}$(Pashler，1988)，两个公式中的 K 代表 WMC，S 或 N 代表目标项目的数量，

H 为击中率(hit rate)，F 为错报率(false alarm rate)。二者可以计算 CDT 任务中的 WMC，如果在测试序列阶段仅呈现单个探测刺激，使用第一个公式；如果探测刺激全部呈现，则使用第二个公式(Rouder et al., 2011)。

第二步，比较有/无分心项目条件下的 *K*(Stout & Rokke, 2010)，获得的比值即为过滤效能分数。其思路为：如果在 3T3D 和 3T 条件下的 WMC 相同，过滤效能得分为 1，说明个体即使受到分心项目的干扰，其表现也和无分心项目时一样，目标项目皆被储存，提示 FE 较好；反之，若过滤效能得分接近 0，则说明 FE 较差。总之，过滤效能分数越高（取值范围是 0~1），FE 越好。

在上述研究思路基础上，还有研究者使用过滤成本(filtering cost)和过滤收益(filtering benefit)评价 FE。如过滤成本是个体在 3T 与 3T3D 条件下任务正确率的差值，得分趋近 0，说明 FE 较好；过滤收益是个体在 3T3D 与 6T 条件下任务正确率的差值，得分越高说明 FE 越好(Hadar et al., 2019a; Sternberg et al., 2018; Stout et al., 2015; Ward et al., 2019)。

以上三个评价指标的核心理念均为对比有/无分心项目条件下的工作记忆绩效，但各有千秋。过滤效能分数的优点是同时考虑了目标项目的数量、击中率和错报率，相比而言更为准确，缺点是计算过程略复杂；过滤成本和过滤效益的优点在于直接利用 CDT 正确率的差值进行测评，计算相对方便、快捷。在本领域的研究中，三者都是常见的 FE 评价指标，后两者是在过滤效能分数的基础上发展而来，因此，不论采用何种评价指标，秉持相同的理念即可。

但是，由于行为层面的测量只能依靠任务结果来对 FE 进行测评，无法了解 FE 的加工阶段和更深入的神经机制，因此，需要更为准确和有效的指标来观察 FE 的发生过程。

1.2.2 神经生理测量

Vogel 和 Machizawa(2004)将事件相关电位(event related potential, ERP)引入到 FE 的研究中，发现了一个里程碑式的指标—对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA)。他们采用对侧控制法，在左右视野中呈现刺激，使得在一侧视野呈现的视觉刺激经视交叉传递后引发对侧大脑半球的强激活，说明该侧脑区反映了相应任务的神经活动。另外，同侧脑区也会由无关因素诱发一定的神经活动。于是，用记忆刺激所在视野的对侧 ERP 减去同侧 ERP 即可将无关因素的影响排除，获得 CDA。它反映了 VWM 对信息的编码(encoding)和保持

(maintenance)，其幅值随着储存刺激数量的增多而提高，在 WMC 达到上限（一般为 4 个）后就不再上升(高在峰 等, 2012)。

Vogel 等(2005)利用 CDA 对客体数量的敏感性特征，直接测量分心项目在 VWM 的储存情况。其思路是：如果个体在 2T2D 条件下的 CDA 幅值与 2T 条件下的幅值差异没有统计学意义，说明分心项目没有进入 VWM，即他/她成功过滤掉了所有的分心项目；同理，如果个体在 2T2D 条件下的 CDA 幅值与 4T 条件下的幅值差异没有统计学意义，说明他/她将分心项目全部储存到了 VWM，过滤失败。但是，仅比较 CDA 幅值无法直接反映 FE 的高低。因为对分心项目的过滤不是全或无，很可能出现 2T2D 的 CDA 幅值分别与 2T 和 4T 的幅值差异都存在统计学意义的情况。这说明个体只过滤掉了部分分心项目，但没有一个具体的数值表示这种情况下的 FE，这样不仅难以进行个体间的比较，而且不利于研究的准确和深入。

据此，Vogel 等(2005)提供了在以上实验条件下利用 CDA 幅值计算 FE 分数的公式：$\alpha = \frac{F-D}{F-T}$，α 代表 FE 分数，F、D、T 分别代表 4T、2T2D 和 2T 时的 CDA 幅值。α 值的正常取值范围是 0~1，D 和 T 越接近，α 值越接近 1，FE 较好；D 和 F 越接近，α 值越接近 0，说明 FE 较差。另外，不同研究所使用的目标项目数量有区别，所以 F、D、T 代表的刺激数量并不总是与上述案例一致，而是根据研究对象特点或者研究目的进行合理的调整(Jost et al., 2011)。

综上，虽然行为指标的获取更简便、快捷，但用 CDA 对 FE 进行交叉检验也是极其必要的。所以，自从引入 CDA 后，研究者们往往会同时使用以上两类测量办法测评 FE(Allon & Luria, 2019; Jia et al., 2014; Jost et al., 2011; Jost & Mayr, 2016; Owens et al., 2013; Qi et al., 2014; Spronk et al., 2013; Stout et al., 2015; Xu et al., 2018; Ye et al., 2018)。也有研究者根据实验材料和目的使用其他脑电指标来替代 CDA，如 N270 波(Zhou et al., 2011)和 Pd 波(Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2018)，但内在逻辑也是用多类评价指标测量被分心项目影响的工作记忆绩效以评价 FE。

1.3 基于表征精度的过滤效能

由于 CDT 只要求研究参与者判断在有/无分心项目条件下的目标项目是否发生了变化，因此只能通过比较两种条件下的 WMC 来评价 FE，而无法采用表征精度来计算 FE。为实现这点，梁怡雯(2016)在颜色回忆任务中加入分心项目考察 FE，程序如下：屏幕中央呈现一

个“十”字注视点，持续约 300~400ms；接着，在注视点上方出现提示线索（一般为向左或向右的箭头，表示接下来的注意方向），持续 200ms 后出现记忆序列；此时在注视点的左右两侧同时呈现数量相等的记忆项目，要求研究参与者盯住屏幕中央，并仅记忆提示箭头所指向一侧的项目。记忆序列的呈现时间为 100~200ms；空屏 900ms 后出现探测界面，此时先在之前所有目标项目呈现过的位置出现黑色方框，并把其中一个方框加粗；同时探测界面中出现 RGB 值（共 180 种颜色）连续变化的彩色圆环。研究参与者需要回忆之前在黑色加粗方框中出现过的目标色块的具体颜色，用电脑鼠标在彩色圆环上进行选择后，试次结束。所有试次完成后，对研究参与者在彩色圆环上选择的颜色与目标色块的原有颜色之间的角度误差进行计算并建模，获得在有/无分心项目条件下的 VWM 表征精度，再将精度值代入公式 $DE_p=\frac{P1-P2}{P1+P2}$计算得出干扰效应(Distractor effect)即过滤效能(刘志英, 库逸轩, 2017)，其中 P1 为 PrecisionT_nD_0，P2 为 PrecisionT_nD_2，T_nD_0 和 T_nD_2 中，T_n 代表不同水平下目标项目的个数，D_0 和 D_2 分别代表无分心和有 2 个分心项目的情况。DE_p 分数越高，表示 FE 越差。

近年来，CRT 因其可以同时分离 VWM 的储存容量和表征精度而逐渐流行。在该任务的基础上加入分心项目，即可测量到基于表征精度的 FE。比起基于储存容量的 FE，本领域的研究需得到进一步的关注。

2 过滤效能的神经机制

除心理认知层面的发生机制外，研究者也在积极探索 FE 的神经发生机制。研究发现 FE 的发生过程包括了若干时间窗口，并伴随多个脑区的激活。下文主要从 FE 的加工阶段和相关脑区介绍 FE 的神经机制。

2.1 过滤效能的加工阶段

大脑对分心项目的过滤是一个连续、多脑区联动的过程，前人研究发现 CDA 可以反映 VWM 的过滤功能，但对过滤的发生机制仍不清楚(Awh & Vogel, 2008; McNab & Klingberg, 2008; Vogel et al., 2005)，于是研究者们采用具有较高时间分辨率的脑电(Electroencephalogram, EEG)技术探索过滤在 VWM 任务中不同时间窗口阶段的脑电波诱发机制和变化情况。目前的研究结果认为 FE 主要包含 3 个认知加工阶段：即觉察分心项目、过滤启动以及实现过滤或储存。

研究者以 CDT 中记忆序列的出现为参照点，提取脑电波进行分析发现(Liesefeld et al., 2014)：(1)刺激呈现时，脑电仪在后部脑区(posterior regions)记录到两种有重叠的成分，首先

是 174~284ms 阶段对目标项目的初步扫描(preliminary scanning)，脑电波幅值随目标项目数量的增多而提高，并在 4 个时达到顶峰，提示大脑觉察到目标项目；接着，201~289ms 阶段，在反映目标项目的基础上，脑电波幅值随分心项目数量的增加有所提高，提示大脑觉察到了分心项目，被称为后部觉察成分(posterior detection component)；(2)245~288ms 阶段，前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)散发偏向信号(bias signals)，根据前人研究提示(Astle et al., 2014; Vogel et al., 2005)，此阶段表示过滤的启动(initiation of filtering)；(3)290~715ms 阶段，顶叶延迟活动(parietal delay activity)出现，提示大脑分别对目标和分心项目开始储存和过滤。在 355ms 以前，包含分心项目（如 2T3D）的试次与数量相等的目标项目（如 5T）试次的幅值无差异，之后前者的幅值显著降低，意味着大脑实现了对分心项目的过滤。如果过滤得不彻底，则分心项目会储存在对负荷敏感的后顶叶皮层(posterior parietal cortex, PPC)，称为不必要储存(unnecessary storage)，它占用了目标项目的储存空间，与 WMC 为负相关。不必要储存从另一个角度反映了 WMC 的个体差异。

该研究(Liesefeld et al., 2014)首次记录了以上 3 个阶段在实现过滤过程中的时间进程，并与前人的研究结果有机地结合，提出加工阶段之间的链式因果关系：大脑首先对刺激进行初步的扫描，觉察到分心项目后诱发偏向信号从而启动过滤，进而实现对分心项目的过滤。若过滤的效率低，分心项目会被储存，反之，则会降低不必要的储存，缓解 VWM 的储存负担。据此可以推测，大脑对分心项目觉察得越早、越快，偏向信号强度越大，抑制分心项目的能量就越强，因此，过滤的效率就越高。但 Cisler 和 Koster(2010)发现焦虑症群体对威胁信息存在注意偏向，高焦虑者通常将注意资源优先分配给威胁信息。Stout 等(2013)也发现焦虑症症状的个体对恐惧面孔可能存在加工偏向，高焦虑者难以过滤恐惧面孔所代表的威胁分心项目。而在有关过滤效能加工阶段的研究中(Liesefeld et al., 2014; McNab & Klingberg, 2008; Vogel et al., 2005; 王思思, 2019)，并未将“焦虑”作为考察的因素。因此，笔者所做出的以上推论目前只适用于无“焦虑”的情境，未来研究可以关注高特质焦虑者在过滤加工阶段的认知神经特点。

综上，在了解了基本的加工阶段和彼此的关系外，研究还有较大的拓展空间，可以考虑探讨觉察分心项目加工阶段的影响因素。如探索震荡同步(oscillatory synchronizations)与三个加工阶段的关系，Engel(2012)发现它可能反映了大脑判断是否为分心项目的机制，这有助于我们进一步拓展现有的研究成果，从而对 FE 的加工阶段有更为全面的了解。

2.2 过滤效能的相关脑区

为了探究哪些脑区与过滤分心项目有关，研究者采用具有较高空间分辨率的 fMRI 技术来回答此问题。现有的研究结果提示：参与整个过滤过程的脑区可以大致独立划分为与过滤和储存有关的区域：(1)在分心项目呈现前的准备过滤阶段(preparation to filter)，主要有前额叶皮层(PFC)和基底核(basal ganglia, BG)区域参与；(2)在分心项目呈现后的过滤阶段，青壮年和老年人的大脑激活区域有所不同；(3)对分心项目的储存以后顶叶皮层(PPC)区域为主。笔者认为 FE 主要依靠 PFC 与 PPC 的协同工作实现，上述两个脑区体现了视觉搜索额–顶网络(fronto-parietal network)的部分功能(魏萍, 康冠兰, 2012)。

2.2.1 分心项目出现前

研究者(Rainer et al., 1998)在灵长类动物身上发现 PFC 与选择和维持目标项目有关。Vogel 等(2005)推测个体在遇到分心项目时 PFC 通过散发偏向信号启动 FE。McNab 和 Klingberg(2008)采用包含分心项目的视-空间工作记忆任务(visual-spatial working memory task)首先支持了他们的推测：(1)研究者记录了大脑在从提示分心项目的线索(task instruction)出现到记忆刺激(memory stimuli)呈现之间(instruction periods)的激活情况，结果发现 PFC 的额中回(middle frontal gyrus, MFG)和 BG 活动更明显，提示二者与诱发准备过滤的神经活动(filtering set activity)有关。已有研究也证实 BG 通过短暂地向 PFC 提供抑制/非抑制信号形成工作记忆的动态门控机制(Hazy et al., 2007)；(2)在记忆刺激到探测刺激出现的时段内，PPC 激活，提示大脑对分心项目进行了编码和储存。在单独测量了 WMC 后，研究者发现 PFC、BG 以及 BG 中苍白球(globus pallidus, GP)的神经活动均与 WMC 显著正相关，提示 PFC 和 BG（特别是 GP）激活程度越高，储存的目标项目越多；同样，研究者还发现 GP 与 PPC 的神经活动显著负相关，提示 GP 的神经活动越强，越少的分心项目被储存，二者的负相关关系在后续的研究中得到了支持性证据(Liesefeld et al., 2014)，但没有发现 PFC 与 PPC 的关系。

McNab 和 Klingberg(2008)的研究得到了其他研究的支持：(1)Peverill 等(2016)对比青少年和成年人的 FE 脑机制(fMRI)时发现 GP 的激活主要起到为过滤启动做准备的功能；(2)在睡眠剥夺的研究中，研究者分析正是因为完全剥夺睡眠(total sleep deprivation)对 PFC 造成了损害，才导致 FE 的下降(Drummond et al., 2012)。但是，WMC 并没有受损，这与 FE 引发 WMC 差异的理论不符。笔者推测可能原因是在该研究中，过滤任务的难度有 3 级，而工作记忆任务难度只有 1 级，研究者只在最高难度的过滤任务中发现了 FE 受损。(3)BG 受损的帕金森症(Parkinson’s disease)群体比正常人的 FE 更差(Lee et al., 2010)；(4)对比过滤训练和

记忆训练对工作记忆绩效提升效果的 fMRI 结果显示，5 天的训练后，过滤训练组的额中回和楔叶(cuneus，位于枕叶皮层 occipital cortex，OCC)两个区域的神经活动增强（训练前后对比），楔叶增强的原因是受到了 PFC 的影响，因为 PFC 可以自上而下地控制 OCC 中的视觉区域，使视知觉最优化(Ress et al., 2000; Sandrini et al., 2008)。

Awh 和 Vogel(2008)综合相关的研究结果，提出过滤的“大脑守门人”假说(bouncer in the brain)，该假说认为决定 WMC 个体差异的关键不是“插槽”的多少，而是过滤分心项目的效率(何旭，郭春彦，2013)。如果将反映视觉信息储存的 PPC 比喻为一个容量有限的宴会厅（鉴于中外文化差异将原文的喻词“nightclub”用“宴会厅”替换），举办宴会时，有两种方案可以保证宴会厅有足够的空间容纳客人：第一种是扩大宴会厅的面积（提高 WMC），第二种是只有受到邀请的宾客（目标项目）才有准入权，该研究认为第二种方案更有可行性。因此，要执行第二种方案，站在门口的守门人(bouncer)就很重要，PFC 和 BG 正是扮演了守门人的角色。在宴会开始前，守门人需要做好准备，根据来访宾客的相关信息，判断其是否受到邀请，并按照全或无(all-or-none)的原则决定谁能进入宴会厅。后来，Liesefeld 等(2014)发现后部脑区成分(posterior distractor-detection component)可以觉察分心项目，认为该成分充当了守门人的眼睛和手，对工作的执行起到重要作用。Emrich 和 Busseri(2015)重新分析了 McNab 和 Klingberg(2008)的研究，提出 BG 的神经活动水平不仅能有效预测对分心项目的编码，还可以直接预测 VWM 的表现，支持了“大脑守门人”假说。最近，研究者(Dube et al., 2017)发现，守门人的工作其实更为精细，它会根据刺激项目对 VWM 的重要程度而对其优先顺序进行分级，然后再重新分配相应的资源，该研究提示守门人可能有更多的高级认知功能有待挖掘。

整体来看，PFC 和 BG 诱发对分心项目的过滤是 VWM 整体认知网络功能的一部分，是 PFC 作为自上而下控制系统相关脑区的反映(D’Esposito & Postle, 2015)。根据 Duncan 和 Fuster 的观点，自上而下控制信号的源头是与规则和目标等抽象认知有关的 PFC 区域，同时该区域会影响其他皮层上或皮层下脑区(Duncan, 2001; Fuster, 2001)。

2.2.2 分心项目出现后

Vellage 等(2016)利用 fMRI 技术，在视–空间工作记忆任务的基础上，设置高、低负荷条件（均含有分心项目），比较青壮年和老年人在分心项目呈现后，过滤和储存的相关脑区。fMRI 结果显示，青壮年与过滤有关的脑区包括双侧脑岛(bilateral insulae)，右侧的枕叶皮质

区(OCC)、脑干(brainstem)和小脑(cerebellum)，其中脑岛与刺激驱动的注意朝向过程有关(Corbetta & Shulman, 2002)；OCC 体现了视觉区域对注意驱动的增强，这与前人研究结果一致(Ruff, 2013)；小脑的激活与 Baier 等(2014)发现小脑受损影响过滤的推测一致，但还需要更多相关研究的支持。老年人的双侧脑岛、腹内侧前额叶皮层(ventromedial prefrontal cortex, VMPFC)和楔前叶(precuneus)在过滤阶段得到了激活。其中，VMPFC 是唯一参与了过滤和储存的脑区，提示 VMPFC 可能是这两种加工处理的接合处(Corbetta & Shulman, 2002; Pessoa et al., 2003)，楔前叶则与信息的抑制功能有关。

已有研究一致认为 PPC（顶内沟和枕内沟）是个体对视觉世界极其有限的心理表征的一个关键神经位点(何旭, 郭春彦, 2013)，Vellage 等(2016)发现青壮年的 PPC、VMPFC 和楔前叶参与了储存；除此之外，老年人的双侧颞中、下回(bilateral middle and inferior temporal gyri)，右侧颞上回(right superior temporal gyrus)，左扣带回(cingulum)以及双侧海马旁回(para hippocampal gyri)得到了激活，体现了更为分散的神经网络特征。

2.2.3 相关脑区在过滤效能中的因果性作用

近年来，研究者们利用经颅直流电刺激(transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)方法分别刺激 PFC 和 PPC，以探究二者分别在干扰过滤和刺激储存中的因果性作用。tDCS 是一种可调控大脑兴奋性的无创技术，通过释放微弱（0.5~2 毫安）、持续（15~30 分钟）的电流作用于大脑皮层，诱发并调节相应区域的神经元兴奋程度，影响与该脑区相关的认知功能表现(Nitsche & Paulus, 2000)。Li 等(2017)发现比起视觉皮层（主动控制组），用电刺激 PFC 提高了研究参与者在有分心项目 CDT 中的 VWM 表现，电刺激 PPC 提高了研究参与者在无分心项目 CDT 中的 VWM 表现，研究结果表示 PFC 过滤无关信息和 PPC 储存目标刺激的能力得到了提高，提示 PFC 和 PPC 在干扰过滤和刺激储存中存在分离性作用。但是，也有研究者(Robison et al., 2017)发现电刺激 PFC 和 PPC 均对 VWM 的表现无显著影响，而他们的研究设计、操作与 Li 等(2017)的非常近似。Robison 等(2017)从多个角度（实验仪器、实验控制、刺激数量、统计检验力等）对两项研究出现不一致结果的原因进行了分析，但似乎还是没有作出让人非常信服的解释。笔者参考相关文献并结合研究者的上述分析，尝试提出一些看法：(1)任务难度不同。在 Li 等(2017)的实验任务中，分心项目的朝向在 0~360 度的范围内随机呈现，而 Robison 等(2017)的分心项目朝向只有 4 个(水平/垂直/左、右各 45 度)。一般来说，比起 4 个朝向角度，361 个可能的朝向角度对识别分心项目的精细度要求更高，

实验任务的难度自然更大。Jones 和 Berryhill(2012)发现任务难度在电刺激 PPC 提升 VWM 表现的关系中起调节作用：比起低任务难度，高难度更能让个体的任务表现从电刺激中受益，而相对简单的任务则可能导致真实与虚假电刺激对任务表现的影响区分度不高，出现天花板效应。研究者还在视觉注意、空间工作记忆等认知任务中也发现了任务难度的调节作用(Pope et al., 2015; Wu et al., 2014)。(2)个体差异。有研究发现电刺激 PPC 提升 VWM 表现的现象只存在于某些特定的群体：如低 WMC 群体(Hsu et al., 2014; Tseng et al., 2012)、低 WMC 老年人(Arciniega et al., 2018)和高外部动机群体(Jones et al., 2015)。这提示 PPC 在 VWM 刺激储存过程中的因果作用可能受到年龄、工作记忆容量和一些情境因素的调控。

综上，目前已有很多研究利用 tDCS 技术考察 PFC 和 PPC 对干扰过滤和刺激储存的因果性作用。大多数研究发现电刺激 PPC 有效提升了 WMC(Di Rosa et al., 2019; Heimrath et al., 2012; Hsu et al., 2014; Li et al., 2017; Tseng et al., 2012; Wang et al., 2019)，支持了 PPC 的活动可以表征刺激储存的理论，而电刺激 PFC 提升 FE 的研究相对较少，且结果仍缺乏一致性，这提示研究者应继续深入分析基于 tDCS 技术探索 PFC 对 FE 的因果性作用。如利用高清 tDCS 仪器更精确地对脑区进行电刺激，弥补传统 tDCS 空间分辨率的不足(郭恒 等, 2016)，并借助神经影像学数据(王思思, 库逸轩, 2018)对 FE 所发生的脑区及其深层机制进行探讨。

总体而言，对 FE 相关脑区的分析获得了初步的成果，形成了“大脑守门人”假说：前额叶皮层和基底核负责对分心项目过滤，后顶叶皮层承担储存刺激的功能。最近几年的研究一直在对“大脑守门人”假说进行不断深入和细化的分析，未来仍有较大的探索空间。比如：(1)比较儿童与成年人“守门人”的发展状况，了解过滤功能的脑发展特征，并考察小脑发育对过滤成熟的支持作用及机制。(2)青壮年和老年人的比较研究提示，与过滤有关的脑区是一个范围比较广的神经过滤网络，但目前尚不清楚各个脑区是如何联系起来，从而共同实现过滤的，王思思利用 tDCS 刺激后顶叶皮层可以同时影响前额叶对分心项目过滤的相关成分和后顶叶刺激储存的相关成分，为进一步探究提供了可能的方向。(3)后部脑区是如何激活前额叶皮层产生偏向信号的？

3 过滤效能的变化特点

在初步了解 FE 的心理、神经发生机制的基础上，系统梳理其动态变化特点及其影响因素十分必要。笔者总结了 FE 变化发展的方向，并尝试对其影响因素进行了归类：(1)正常变

化趋势（年龄的影响）；(2)损伤和弱化（特殊障碍和情绪的影响）；(3)改善和提升（认知特点的影响）。

3.1 毕生发展——正常变化趋势

研究者们比较了不同年龄组的 FE，探讨了年龄对其动态变化的影响特点。

首先，研究者(Spronk et al., 2012)将青少年（12~16 岁)与成年人（20~45 岁）的 FE 进行比较，行为和 CDA 结果均显示前者的 FE 显著弱于后者。此外，Plebanek 和 Sloutsky(2019) 关于儿童（4 岁和 7 岁）和成年人的研究和 Peverill 等(2016)关于青少年（平均年龄 16.74 岁）的研究也为 Spronk 等(2012)的研究提供了实证支持，提示青少年的 FE 正处于发育阶段，因此需要注意培养未成年群体的 FE。

其次，抑制缺陷假说(Hasher & Zacks, 1988，引自 Jost et al., 2011)认为个体抑制无关信息的功能随着年龄增长可以部分解释 WM 的功能退化。Gazzaley 等(2008)通过实验发现，老年人的 VWM 存在对抑制无关信息的选择缺陷，但是该缺陷仅发生在视觉处理过程的早期，说明老年人抑制无关信息的能力只是部分衰退。沿着这个思路，Jost 等(2011)提出，如果选择缺陷发生在编码阶段(encoding stage)的早期，那么 FE 的缺陷将在信息储存阶段(memory retention interval)的早期凸显出来。这一观点得到了实验支持：比较青壮年（平均年龄 24.5 岁）和老年人（平均年龄 72.8 岁）的研究提示，整体而言，老年人的工作记忆绩效较差；ERP 结果显示，青壮年的过滤出现在信息储存阶段的早期(375~400ms)并延续至中期(550ms)，老年人则直到中晚期(600~625ms)才开始对无关信息进行过滤。进一步分析发现，年龄导致的加工速度差异主要集中在 350~550ms，此后二者无显著差异，说明老年人的过滤启动较青壮年有延迟，提示两群体的脑功能可能存在差异。Vellage 等(2016)的研究为上述结果提供了可能解释，他们发现青壮年（平均年龄 25.7 岁）与老年人（平均年龄 65.8 岁）的 FE 分数没有显著差异，但 fMRI 结果显示两群体执行过滤功能的脑区有所不同，相比青壮年，老年人在完成同等认知负荷的工作记忆任务时，激活了 VMPFC。提示对于老年人来说，当任务的难度较大时，将通过增强前额叶皮层的活性以投入更多的心理资源完成任务，而青壮年则不需要激活额外的脑区即可顺利完成任务。因此，研究者推测老年人是通过激活的更多脑区以实现与青壮年同一水平的过滤功能。该说法与 Payer 等(2006)提出的前额叶激活程度与任务难度有关的主张一致。目前，根据该领域相关研究（比较青壮年和老年人的 FE）可作出如下推断：两群体的 FE 基本无太大差距，但加工时长存在差异，青壮年能够较为高效、

快速地完成过滤任务，而老年人需花费更多时间、调动更多脑区来实现对分心项目的过滤。该结果部分支持了抑制缺陷假说，未来仍需积累相关研究证据，并通过元分析进一步探索和总结。

综上，笔者根据已有的研究推测 FE 的毕生发展特点部分近似倒 U 型曲线：在青少年期快速发展，成年早期达到顶峰之后呈现下降趋势，但并不会出现非常明显的下降。这与流体智力在成年后随年龄增长而下降的特点有相同和不同之处：相同之处在于二者都会在达到顶峰后出现下降，不同之处在于 FE 的下降幅度慢于流体智力。未来需要从研究数量与深度方面检验该设想，可尝试采用纵向追踪研究（例如追踪考察老年人 FE 的变化特点）或对全年龄组进行比较等方式验证。此外，亦可考察 FE 在年龄与其他认知功能关系中的作用。

3.2 损伤和弱化

研究者分别探讨了特质（特殊障碍）和状态（情绪）因素对 FE 变化的影响，发现上述两类因素主要造成了 FE 的损伤和弱化。

3.2.1 特殊障碍诱发的过滤效能损伤

研究者考察了患有精神障碍/神经疾病（包括帕金森症、特质焦虑、抑郁障碍、注意缺陷与多动障碍、自闭症谱系障碍和精神分裂症）群体的 FE，这有助于了解 FE 的损伤特点，加深对其发展和病变机制的理解。

Lee 等(2010)对帕金森症群体(平均年龄 66.71 岁)的研究发现，他们在有分心项目的 CDT 的表现比正常同龄人（平均年龄 68.57 岁）更差，行为与脑电指标均提示帕金森病损害了过滤分心项目的能力。主要原因是帕金森症患者的基底核(BG)区域受损，该研究为 FE 相关脑区的研究提供了支持证据。

Stout 和 Rokke(2010)是最早关注特质焦虑影响 FE 的学者之一。他们发现状态焦虑、反思和抑郁等会损伤 FE，进一步分析发现 WMC 可能存在调节作用，只有低容量个体存在该效应。Moriya 和 Sugiura(2012)发现高特质焦虑和社交焦虑也会导致较差的 FE，但 WMC 不存在调节作用，原因是该研究没有设低特质焦虑组。Qi 等(2014)关于特质焦虑对 FE 影响的研究发现，高特质焦虑组的 FE 更差，WMC 的调节作用只适用于低特质焦虑组，该研究也得到了另外两项研究的支持(Stout et al., 2013, 2015)。Moran(2016)对上述 5 项研究进行元分析的结果表明，特质焦虑对 FE 的损伤为中等偏大的效果量($g = -.700$, $k = 5$, $N = 229$, $p < .001$)。另外，笔者发现高特质焦虑组无论是在面对带有威胁(Stout et al., 2013, 2015)还是中性属性

(Moriya & Sugiura, 2012; Qi et al., 2014)的分心项目时都表现出过滤的不足。综上所述，特质焦虑对 FE 的影响可以归纳为高特质焦虑损伤 FE。笔者推测这可能是特质焦虑破坏视觉工作记忆绩效的机制：特质焦虑似乎会干扰注意的抑制控制，使得个体难以过滤掉分心项目并占用 VWM 用于处理目标项目的一部分容量，最终导致任务表现变差。高特质焦虑作为焦虑症、抑郁症和一些其他精神障碍的危险因素，研究者(Thiruchselvam et al., 2012)认为探讨其与工作记忆的关系有助于了解焦虑相关的认知过程如何影响个体的行为表现。

研究者(Owens et al., 2012)使用 ERP 发现抑郁障碍（dysphoria，旧称"抑郁性神经症"）群体比正常人的 FE 更差，抑制功能受损是主要原因，而通过认知训练可以有效改善 FE(Owens et al., 2013)。

Spronk 等(2013)比较了正常人、注意缺陷与多动障碍(attentional deficit hyperactivity disorder, ADHD)群体的 FE，结果二者无显著差异。行为和 ERP 结果均显示，ADHD 未成年群体与同龄正常人无差异，ADHD 成年群体与同龄正常人无差异。研究结果提示关于 ADHD 群体的发育迟滞理论(developmental lag theories of ADHD)可能不适用于 FE。该理论(Doehnert et al., 2010)通过比较 ADHD 群体与正常人的多个认知功能的发育特点，发现前者的认知功能发育轨迹与正常人基本无差异，只是开始发育的时间有所滞后，即与同龄正常人比起来，ADHD 群体的认知功能（如抑制和语词记忆）发育更为迟缓，水平较低。而在 Spronk 等(2013)的研究中，并没有发现 FE 发育迟缓的证据，但他们未分析可能的原因，今后应尝试采用纵向研究进一步验证该研究结果，并挖掘其背后的相关脑机制。

研究者(Bodner et al., 2019)发现成年自闭症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)群体与正常成年人的 FE 水平基本持平，而儿童 ASD 群体的 FE 比正常人差，但到青少年时期这种差距会减小。关于 ASD 群体选择抑制功能的研究也发现 ASD 只损伤过滤，其他功能与正常人无异(Christ et al., 2011)。这提示，如果 ASD 群体在成长的过程中及时进行长期、稳定的改善训练，其过滤功能也可达到正常人水平(Koshino et al., 2007)。

精神分裂症(Schizophrenia)群体在 CDT 的表现与正常人无异(Gold et al., 2006)。冉雪梅(2017)采用 CRT 发现精神分裂症群体的 FE 不仅没受到损伤，而且可能比正常人能更好地完成任务。可能原因是他们有过度专注的倾向，即将内部保持的记忆表征控制在最少，仅将有限的心理资源投注到极少的目标上。虽然过度专注倾向并没有破坏 FE，但它对整体 VWM

造成了严重的损伤，表现在精神分裂症群体的储存容量和表征精度都弱于正常人。这为了解精神分裂症群体高级认知功能损伤背后的机制提供了重要的实证依据。

3.2.2 情绪弱化过滤效能

多个研究提示，个体在被社会排斥(social exclusion)之后的情绪处理方式会破坏工作记忆绩效(Buelow et al., 2015; Hawes et al., 2012; O'luanaigh et al., 2012)。Xu 等(2018)发现，与接纳组相比，受社会排斥组的 FE 更差，可能原因是受到社会排斥以后，人们会更加关注社会性的信息（如微笑面孔）以期望自己被接纳，或者将自我控制资源用于压抑负性情感。这两种做法都会导致用于认知控制的注意资源受限，从而破坏工作记忆绩效。

龙芳芳(2018)通过诱发消极情绪考察其对高、低 WMC 组的 FE 影响，发现消极情绪会提升低 WMC 组的 FE；高 WMC 组的 FE 则不受影响。她认为低 WMC 组的 FE 提升现象可能是由消极情绪的增强效应所引起。而 Ye 等(2018)关于情绪面孔影响 FE 的研究发现，比起高 WMC 组，低 WMC 组对快乐面孔的过滤较好，但难以过滤掉中性与愤怒面孔，提示消极情绪可能会损伤低 WMC 个体的 FE。以上两项研究结果存在不一致的可能原因是：(1)龙芳芳的实验虽然成功诱发了消极情绪，但研究参与者在 PANAS 上消极情绪维度的平均得分约为 18，甚至低于中位数 30，意味着消极情绪的强度并不高，而且未报告效果量。因此，笔者推测可能只是较低强度的消极情绪可以引发增强效应，或许可以在未来研究中讨论消极情绪增强效应的剂量表现。(2)Ye 等(2018)对该结果的解释是从对情绪面孔的加工偏向入手，并未对情绪进行直接测量。

3.3 改善和提升

研究显示个体的认知特点对 FE 存在影响。具体而言，独立分析的认知风格、抓住信息本质的思维模式和高表征精度对 FE 有益。另外，增加线索和通过有针对性地训练也可以有效提升 FE。

Jia 等(2014)提出认知风格影响 FE。他们发现场依存型(field dependence, FD)和场独立型(field independence, FI)组在完成有分心项目的 CDT 时，FI 组的行为指标（正确率）和认知神经指标(CDA)均显著优于 FD 组，提示倾向于使用内部信息，对刺激进行独立分析的场独立型认知风格可以提升 FE。可能的原因是在储存阶段，即使没有了线索刺激，FI 组依然可以依靠内部信息进行认知，而喜欢借助外部刺激进行认知加工的 FD 组如果没有线索刺激的帮助，就可能会将分心项目也纳入到工作记忆中。

思维模式对 FE 也有影响(Hadar et al., 2019b)。研究者认为 FE 的本质与解释水平理论(construal-level theory, CLT)的主张类似。CLT 认为对某个信息的心理表征水平穿梭于具体(concrete)和抽象(abstract)的变化轴上，据此将人的思维模式(mindset)二分为抽象和具体(Liberman & Trope, 2008, 2014)。采用抽象思维模式识别信息时，会保留该信息最本质的属性，忽视一些修饰性的信息。如“蒜苗回锅肉”在抽象思维模式下的心理表征就是“食物”。同样，在完成某一类过滤任务时，个体根据任务要求需要抓住目标项目的本质属性（如三角形），并过滤掉其他无关信息（如红色）。于是，研究者通过实验室操作诱发具体和抽象的思维模式，结果发现，抽象思维模式组的 FE 比具体思维模式组更好。该研究提示个体对事物/信息的解释水平越抽象，越有利于成功地过滤无关信息。

刘志英和库逸轩(2017)发现认知负荷、知觉表征精度与 FE 有关。总体而言，高、低知觉表征精度组在完成有分心项目的 CRT 时，高知觉表征精度组 FE 较好，而知觉表征精度较低组则更容易受到干扰。具体来说，认知负荷高时，知觉表征精度正向预测个体的 FE。该研究结果提示 VWM 的表征质量会限制后续的认知加工。研究者分析可能的原因是不同水平的知觉表征能力影响 VWM 加工的不同阶段。

在任务中增加线索信息可以有效地提升 FE。研究者(Allon et al., 2019)基于格式塔(Gestalt)心理学强调从整体到部分自上而下地加工信息的主张，利用两类图形组织的原则作为提示线索，将目标项目和分心项目按照(1)错觉物体组织原则(illusory object, 具体为 Kanizsa triangle)和(2)接近性组织原则(proximity)的分布规律进行分组，并与随机位置分布时的过滤表现进行比较。5 个实验的研究结果提示：原则(1)只用于目标项目时可以提升 FE，而原则(2)用于目标和分心项目皆可提升 FE。说明格式塔式的组织线索有助于 VWM 中的过滤表现。此外，Allon 和 Luria(2017)认为，早期的提示线索对分心项目的过滤效果持续时间较短，需要在后期重新激活以提升过滤能力(Allon & Luria, 2019)。因此，该研究在记忆序列和测试序列都设置了提示线索，ERP 结果提示，早期的提示线索可以降低对分心项目的关注，进而提升 FE。研究者(刘志英, 库逸轩, 2017)提出线索提示增强 FE 的脑机制主要是在准备过滤阶段大脑的视觉和前额叶区域出现了目标导向的神经活动，另外，外显注意和内隐注意都能够利用线索提升过滤效能。

研究者发现有针对性的训练有助于提高 FE。Schmicker 等(2016)使用过滤训练（filtering training, FT, 训练方法为选择目标项目，不需要记忆）和记忆训练（memory training, MT, 训

练方法为只记忆目标项目，没有分心项目）改善工作记忆绩效。训练为期 5 天，每天训练 1 小时，训练难度逐渐增加（刺激数目增多），然后比较两组在 CDT 上（根据有无记忆和过滤要求分为 4 个子任务）的前、后测成绩，结果显示两组在 4 个子任务上的后测成绩显著高于前测，FT 组在有记忆有过滤子任务上的准确率显著高于 MT 组。说明 FT 和 MT 都有助于提升工作记忆绩效，FT 对 FE 的提升效果更好。Owens 等(2013)针对抑郁障碍群体进行双维 n-back 任务训练（为期 8 天），考察实验组和控制组在 CDT 上的行为指标（正确率，WMC 和 FE 分数）和脑电指标(CDA)的前、后测变化。结果显示，与控制组相比，实验组的 WMC 和 FE 均显著提高，提示该训练可以对认知功能产生普适性的改变(Shipstead et al., 2010)。

最后，虽然利用 tDCS 技术刺激 PFC 以提升 FE 的研究存在不一致的结果，但由于只有两项研究，因此有必要继续深入探索。

4 过滤效能研究仍需解决的问题

本文尝试对近十几年来新兴的过滤效能的研究进行梳理和总结，并概括如下：

(1)过滤效能的发生一般基于视觉工作记忆的储存容量或表征精度，分别采用变化觉察任务和颜色回忆任务来实现。

(2)过滤效能的神经发生过程依次涉及大脑的前额叶皮层和基底核区域、后顶叶皮层，并主要分为 3 个认知阶段（觉察、启动和过滤或储存）。

(3)过滤效能的变化特点有 3 个：正常发展、损伤和弱化、改善和提升，相关影响因素主要包括年龄、特殊障碍、情绪和认知特点。

笔者认为，在 Vogel 等(2005)将 CDA 引入过滤效能的研究之后，该领域的研究循序渐进，但仍存在一些需解决的问题。下文将从过滤效能与工作记忆容量的关系、过滤效能的心理实现过程、不同年龄、特殊障碍和职业等群体过滤效能的脑机制研究以及提升基础研究范式的生态学效度等角度出发，结合已有研究的不足，展望未来研究的可能方向。

4.1 过滤效能与工作记忆容量的关系

Luria 等(2016)对 7 项关于 FE 与 WMC 的实验研究进行元分析的结果表明二者之间为中等效果量的正相关(r = 0.478，p < .001，95%CI[0.356, 0.585])。后续关于二者关系的研究支持了他们元分析的结果(Spronk et al., 2012; Ye et al., 2018)：如比起高 WMC 组，低 WMC 组更难以过滤掉威胁信息。最近关于 FE 发展的几项研究(Manza et al., 2014; Peverill et al., 2016;

Plebanek & Sloutsky, 2019; Spronk et al., 2013)发现，FE 到成年之前一直在发展，结合老年人的研究，提示研究者应该考虑第三变量（如年龄）对二者关系的影响。

鉴于目前对 FE 的行为测量大多基于 WMC 进行探讨，无法直接揭示二者的因果关系。但一些研究提出 FE 是导致 WMC 个体差异的关键因素(Luck & Vogel, 2013; McNab & Klingberg, 2008)，为探索二者的因果关系提供了方向。结合“大脑守门人”假说的主张，研究者认为 FE 可能比 WMC 更能反映视觉工作记忆的功能和水平。因此，有必要设计直接测量 FE 的办法，如研究者(Mall et al., 2014)采用眼动技术中的注视时长来评价 FE，但应注意将其与准确率结合起来对 FE 进行综合评价；或者尝试采用单被试研究模式以更好地厘清二者的关系，有利于更深入探索视 VWM 的核心要素和功能。

4.2 过滤效能的心理实现过程

FE 被认为是个体选择与当前任务相关性最高的信息进入 VWM，同时阻止对无关信息纳入的能力，属于自上而下控制系统的功能，研究者以分心项目在多大程度上被储存作为判断 FE 优劣的标准之一。由于 CDA 只能反映刺激储存的结果，而无法反映过滤实现的过程，因此当下需要解决的一个问题是过滤究竟是如何实现的，是通过加强对目标项目的关注还是对分心项目的抑制，亦或二者皆有之？

VWM 心理资源分配的两阶段模型由 Ye 等(2017)提出，他们认为个体在表征目标项目时，心理资源的分配经历被动和主动分配两个过程，其中被动分配在前。当个体初次接触到目标项目时，心理资源将分配到每一个项目，即被动分配阶段，该阶段由外部刺激驱动，属于自下而上的认知处理；接着，对目标项目的认知加工过渡到主动分配阶段，个体将根据实验任务要求重新调整心理资源的分配，属于自上而下的认知处理。从 VWM 表征的数量和精度权衡角度看，前者追求目标项目的数量，每个项目所需心理资源较少，并以较低的精度储存。一般发生在记忆时间较短、记忆负荷较大的情境。后者追求目标项目的精度，每个项目所需心理资源较多，并以较高的精度储存。一般发生在记忆时间较长、记忆负荷较小的情境。虽然两阶段模型重点关注的是无分心项目条件下 VWM 对刺激的巩固和储存，但其关于记忆资源分配的主张在一定程度上与 VWM 对分心项目的过滤机制存在一致性，即先被动将资源分配给所有项目(Allen et al., 2014; Liesefeld et al., 2014)，然后利用自上而下的认知过程主动将更多的资源分配给目标项目。近期有研究者(Ye et al., 2019)发现在允许个体自上而下自主分配记忆资源的情况下，高 WMC 组比低 WMC 组拥有更好的记忆资源分配能力，

可以更好地在数量和精度之间进行权衡。该研究支持了两阶段模型，并与前人(Vogel et al., 2005)关于 WMC 影响 FE 的研究结果一致。

Feldmann-Wüstefeld 和 Vogel(2018)通过研究首次发现，个体在过滤分心项目时，大脑出现了代表对刺激进行抑制的 Pd 波，其幅值随分心项目数量和复杂程度增加而提高，且与 WMC 呈正相关($r = 0.43$，$p < .001$，95%CI[0.25, 0.58])，而高 WMC 意味着更好的 FE(Gaspar et al., 2016; Vogel et al., 2005)。该研究认为对分心项目的抑制可能是提高 FE 的机制之一。还有研究者发现，在 CDA 出现的同时，后顶叶皮层的整体 alpha 能量抑制活动随着分心项目出现数量的增加而增强，承担了对当前加工信息的注意功能(王思思, 2019)。与根据二阶段模型所做出的推测不同，上述研究认为 FE 是通过对分心项目的抑制实现的。

未来研究可以尝试检验二阶段模型对 FE 的推测，进一步深入探讨 FE 的心理实现过程。

4.3 不同年龄、特殊障碍和职业等群体过滤效能的脑机制研究

首先，在上文（见“3.1 毕生发展”）中，笔者提到老年人与青壮年的 FE 在行为层面的表现接近，但是大脑加工过程存在一定的差异，老年人诱发的脑区更广，提示二者 FE 的神经机制可能不同。同样，研究者也发现青少年执行过滤任务时的脑区与成年人也有一定的区别（见上文“2.2.2 分心项目出现后”），提示不同年龄群体的 FE 脑机制存在差异，值得继续深入研究，如检验“老年人通过诱发更广泛的脑区以补偿过滤效能”的猜想等。

第二，对特殊心理/生理障碍的群体的关注（如 ADHD 患者的过滤效能与正常人无异），有助于深入了解 FE 的病变机制，可能为过滤效能的改善提供启发。

最后，应该关注不同职业（如驾驶员、运动员）的 FE。FE 可能与其专业操作表现存在较密切的联系，通过脑机制和干预研究，可以尝试开发有针对性的措施以改善和提高 FE，使研究产生应用价值。

4.4 提升基础研究范式的生态学效度

基于储存容量的 FE 研究范式以变化觉察任务和视-空间工作记忆任务两种范式为主，前者常应用于行为和使用 ERP 技术的研究，而后者多见于使用 fMRI 技术的研究。二者的不同之处在于提示线索的作用，前者只提示注意的方向(Vogel et al., 2005)，后者则直接提示实验试次是否包含分心项目以诱发自上而下的加工(McNab & Klingberg, 2008)。另外，还有基于表征精度的颜色回忆任务(Zhang & Luck, 2008)也可测量 FE。因此，应根据研究目的选择合适的范式。但值得注意的是，不论是提示注意方向还是分心项目，与实际都有一定的区别。

在日常生活中我们往往无法仅根据线索成功预测分心项目出现的时间和位置，或许可以尝试在实验室中利用虚拟现实(virtual reality, VR)技术模拟真实的生活情境作为实验操作的环境，如通过 VR 模拟真实的汽车驾驶场景，对驾驶员的过滤效能进行研究。

FE 基础研究范式的刺激材料多为抽象的几何图案，分心项目的数量一般不超过 3 个。随着研究群体的多样化，考虑到实验对不同群体的难易度，有必要适当改变刺激材料的属性或者分心项目的数量，再或者时间窗口的时长，否则可能会产生天花板效应或地板效应。比如在 Plebanek 和 Sloutsky(2019)的研究中，考虑到不同年龄段个体的思维形态（抽象思维和形象思维）发展水平不同，儿童组的实验刺激是卡通动物（小鸡和小兔）形象，成年组的则为几何图案。另外，儿童组刺激呈现时间为 500ms，成人组则为 100ms。刺激形象和呈现时间符合儿童和成人的认知发展规律，在一定程度上通过控制无关变量的方式提高了研究的生态效度，这点也需要引起研究者的重视。例如，若研究篮球运动员的 FE，可以根据篮球运动的特点，将篮球、场上运动员或观众面孔等作为刺激材料。

参考文献

高在峰，郁雯珺，徐晓甜，尹军，水仁德，沈模卫. (2012). 对侧延迟活动：视觉工作记忆信息存储的ERP指标. *科学通报, 57*(30), 2806–2814. https://doi.org/10.1360/972012-728

郭恒，何莉，周仁来. (2016). 经颅直流电刺激提高记忆功能. *心理科学进展, 24*(3), 356–366. https://doi.org/10.3724/sp.j.1042.2016.00356

何旭，郭春彦. (2013). 视觉工作记忆的容量与资源分配. *心理科学进展, 21*(10), 1741–1748. https://doi.org/10.3724/sp.j.1042.2013.01741

库逸轩. (2019). 工作记忆的认知神经机制. *生理学报, 71*(1), 173–185. https://doi.org/10.13294/j.aps.2019.0004

梁怡雯. (2016). *工作记忆加工中抑制干扰的神经机制研究.* (硕士学位论文). 华东师范大学，上海.

刘志英，库逸轩. (2017). 知觉表征精度对工作记忆中抑制干扰能力的影响. *心理学报, 49*(10), 1247–1255.

龙芳芳. (2018). *负性情绪状态对视觉工作记忆资源分配及过滤效率的影响.* (硕士学位论文). 辽宁师范大学，沈阳.

冉雪梅. (2017). *精神分裂症患者的视觉工作记忆损伤：来自行为和脑电的证据.* (硕士学位论文). 华东师范大学，上海.

世界卫生组织. (2018). *道路交通伤害.* 2018-12-07取自 https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries

王思思. (2019). *视觉工作记忆的存储和干扰抑制的神经机制.* (博士学位论文). 华东师范大学，上海.

王思思，库逸轩. (2018). 右侧背外侧前额叶在视觉工作记忆中的因果性作用. *心理学报, 50*(7), 727–738. https://doi.org/10.3724/sp.j.1041.2018.00727

魏萍，康冠兰. (2012). 奖赏性线索启动和调控视觉搜索额顶网络的神经机制. *心理科学进展, 20*(6), 798–804.

张宁宁. (2012). *基于神经人因学的人–车交互系统若干问题的研究.* (博士学位论文). 东北大学，沈阳.

Allen, R. J., Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2014). Evidence for two attentional components in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *40*(6), 1499–1509. https://doi.org/10.1037/xlm0000002

Allon, A. S., & Luria, R. (2017). Compensation mechanisms that improve distractor filtering are shortlived. *Cognition*, *164*, 74–86.

Allon, A. S., & Luria, R. (2019). Filtering performance in visual working memory is improved by reducing early spatial attention to the distractors. *Psychophysiology*, *56*(5), Article e13323. https://doi.org/10.1111/psyp.13323

Allon, A. S., Vixman, G., & Luria, R. (2019). Gestalt grouping cues can improve filtering performance in visual working memory. *Psychological Research*, *83*(8), 1656–1672. https://doi.org/10.1007/s00426-018-1032-5

Arciniega, H., Gözenman, F., Jones, K. T., Stephens, J. A., & Berryhill, M. E. (2018). Frontoparietal tDCS benefits visual working memory in older adults with low working memory capacity. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *10*, Article 00057. https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00057

Astle, D. E., Harvey, H., Stokes, M., Mohseni, H., Nobre, A. C., & Scerif, G. (2014). Distinct neural mechanisms of individual and developmental differences in VSTM capacity. *Developmental Psychobiology*, *56*(4), 601–610. https://doi.org/10.1002/dev.21126

Awh, E., & Vogel, E. K. (2008). The bouncer in the brain. *Nature Neuroscience*, *11*(1), 5–6. https://doi.org/10.1038/nn0108-5

Baier, B., Müller, N. G., & Dieterich, M. (2014). What part of the cerebellum contributes to a visuospatial working memory task? *Annals of Neurology*, *76*(5), 754–757. https://doi.org/10.1002/ana.24272

Bodner, K. E., Cowan, N., & Christ, S. E. (2019). Contributions of filtering and attentional allocation to working memory performance in individuals with autism spectrum disorder. *Journal of Abnormal Psychology*, *128*(8), 881–891. https://doi.org/10.1037/abn0000471

Buelow, M. T., Okdie, B. M., Brunell, A. B., & Trost, Z. (2015). Stuck in a moment and you cannot get out of it: The lingering effects of ostracism on cognition and satisfaction of basic needs. *Personality and Individual Differences*, *76*, 39–43.

Christ, S. E., Kester, L. E., Bodner, K. E., & Miles, J. H. (2011). Evidence for selective inhibitory impairment in individuals with autism spectrum disorder. *Neuropsychology*, *25*(6), 690–701. https://doi.org/dx.doi.org/10.1037/a0024256

Cisler, J. M., & Koster, E. H. W. (2010). Mechanisms of attentional biases towards threat in anxiety disorders: An integrative review. *Clinical Psychology Review*, *30*(2), 203–216. https://doi.org/10.1016/j.cpr.2009.11.003

Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(3), 201–215. https://doi.org/10.1038/nrn755

Cowan, N., Fristoe, N. M., Elliott, E. M., Brunner, R. P., & Saults, J. S. (2006). Scope of attention , control of attention , and intelligence in children and adults. *Memory & Cognition*, *34*(8), 1754–1768.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(1), 114–185.

D'Esposito, M., & Postle, B. R. (2015). The cognitive neuroscience of working memory. *Annual Review of Psychology*, *66*(1), 115–142. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015031

Di Rosa, E., Brigadoi, S., Cutini, S., Tarantino, V., Dell'Acqua, R., Mapelli, D., … Vallesi, A. (2019). Reward motivation and neurostimulation interact to improve working memory performance in healthy older adults: A simultaneous tDCS-fNIRS study. *NeuroImage*, *202*, Article 116062. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116062

Doehnert, M., Brandeis, D., Imhof, K., Drechsler, R., & Steinhausen, H. C. (2010). Mapping attention-deficit/hyperactivity disorder from childhood to adolescence—no neurophysiologic evidence for a developmental lag of attention but some for inhibition. *Biological Psychiatry*, *67*(7), 608–616. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.07.038

Drummond, S. P. A., Anderson, D. E., Straus, L. D., Vogel, E. K., & Perez, V. B. (2012). The effects of two types of sleep deprivation on visual working memory capacity and filtering efficiency. *PLoS ONE*, *7*(4), Article e0035653. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035653

Dube, B., Emrich, S. M., & Al-Aidroos, N. (2017). More than a filter: Feature-based attention regulates the distribution of visual working memory resources. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*(10), 1843–1854. https://doi.org/10.1037/xhp0000428

Duncan. (2001). An adaptive coding model of neural function in prefrontal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(11), 820.

Emrich, S. M., & Busseri, M. A. (2015). Re-evaluating the relationships among filtering activity, unnecessary storage, and visual working memory capacity. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *15*(3), 589–597. https://doi.org/10.3758/s13415-015-0341-z

Engel, A. K. (2012). Rules got rhythm. *Neuron*, *76*(4), 673–676. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.11.003

Feldmann-Wüstefeld, T., & Edward K. Vogel. (2018). Neural evidence for the contribution of active suppression during working memory filtering. *Cerebral Cortex*, *29*(2), 529–543.

Fougnie, D., Suchow, J. W., & Alvarez, G. A. (2012). Variability in the quality of visual working memory. *Nature Communications*, *3*(1), 1228–1246. https://doi.org/10.1038/ncomms2237

Fuster, J. M. (2001). The prefrontal cortex—an update: Time is of the essence. *Neuron*, *30*(2), 319–333.

Gaspar, J. M., Christie, G. J., Prime, D. J., Jolicœur, P., & McDonald, J. J. (2016). Inability to suppress salient distractors predicts low visual working memory capacity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(13), 3693–3698.

Gazzaley, A., Clapp, W., Kelley, J., McEvoy, K., Knight, R. T., & D'Esposito, M. (2008). Age-related top-down suppression deficit in the early stages of cortical visual memory processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(35), 13122–13126.

Ge, Y., Sheng, B., Qu, W., Xiong, Y., Sun, X., & Zhang, K. (2020). Differences in visual-spatial working memory and driving behavior between morning-type and evening-type drivers. *Accident Analysis and Prevention*, *136*, Article 105402. https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105402

Gold, J. M., Fuller, R. L., Robinson, B. M., McMahon, R. P., Braun, E. L., & Luck, S. J. (2006). Intact attentional control of working memory encoding in schizophrenia. *Journal of Abnormal Psychology*, *115*(4), 658–673. https://doi.org/10.1037/0021-843X.115.4.658

Hadar, B., Luria, R., & Liberman, N. (2019a). Induced social power improves visual working memory. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *46*(2), 285–297. https://doi.org/10.1177/0146167219855045

Hadar, B., Luria, R., & Liberman, N. (2019b). Concrete mindset impairs filtering in visual working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(6), 1917–1924. https://doi.org/10.3758/s13423-019-01625-6

Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. *The psychology of learning and motivation, 22*, 193–225.

Hawes, D. J., Zadro, L., Fink, E., Richardson, R., O'Moore, K., Griffiths, B., & Williams, K. D. (2012). The effects of peer ostracism on children's cognitive processes. *European Journal of Developmental Psychology*, *9*(5), 599–613.

Hazy, T. E., Frank, M. J., & O'Reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus: Computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *362*(1485), 1601–1613. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2055

Heimrath, K., Sandmann, P., Becke, A., Müller, N. G., & Zaehle, T. (2012). Behavioral and electrophysiological effects of transcranial direct current stimulation of the parietal cortex in a visuo-spatial working memory task. *Frontiers in Psychiatry*, *3*, Article 00056. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2012.00056

Hsu, T. Y., Tseng, P., Liang, W. K., Cheng, S. K., & Juan, C. H. (2014). Transcranial direct current stimulation over right posterior parietal cortex changes prestimulus alpha oscillation in visual short-term memory task. *NeuroImage*, *98*, 306–313. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.04.069

Jia, S., Zhang, Q., & Li, S. (2014). Field dependence-independence modulates the efficiency of filtering out irrelevant information in a visual working memory task. *Neuroscience*, *278*, 136–143. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.07.075

Johnson, M. K., McMahon, R. P., Robinson, B. M., Harvey, A. N., Hahn, B., Leonard, C. J., … Gold, J. M. (2013). The relationship between working memory capacity and broad measures of cognitive ability in healthy adults and people with schizophrenia. *Neuropsychology*, *27*(2), 220–229. https://doi.org/10.1037/a0032060

Jones, K. T., & Berryhill, M. E. (2012). Parietal contributions to visual working memory depend on task difficulty. *Frontiers in Psychiatry*, *3*, Article 00081. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2012.00081

Jost, K., Bryck, R. L., Vogel, E. K., & Mayr, U. (2011). Are old adults just like low working memory young adults? Filtering efficiency and age differences in visual working memory. *Cerebral Cortex*, *21*(5), 1147–1154. https://doi.org/10.1093/cercor/bhq185

Jones, K. T., Gözenman, F., & Berryhill, M. E. (2015). The strategy and motivational influences on the beneficial effect of neurostimulation: A tDCS and fNIRS study. *NeuroImage*, *105*, 238–247. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.11.012

Jost, K., & Mayr, U. (2016). Switching between filter settings reduces the efficient utilization of visual working memory. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *16*(2), 207–218. https://doi.org/10.3758/s13415-015-0380-5

Koshino, H., Kana, R. K., Keller, T. A., Cherkassky, V. L., Minshew, N. J., & Just, M. A. (2007). fMRI investigation of working memory for faces in autism : Visual coding and underconnectivity with frontal areas. *Cerebral Cortex*, *18*(2), 289–300. https://doi.org/10.1093/cercor/bhm054

Lee, E. Y., Cowan, N., Vogel, E. K., Rolan, T., Valle-Inclán, F., & Hackley, S. A. (2010). Visual working memory deficits in patients with Parkinson's disease are due to both reduced storage capacity and impaired ability to filter out irrelevant information. *Brain*, *133*(9), 2677–2689. https://doi.org/10.1093/brain/awq197

Li, S., Cai, Y., Liu, J., Li, D., Feng, Z., Chen, C., & Xue, G. (2017). Dissociated roles of the parietal and frontal cortices in the scope and control of attention during visual working memory. *NeuroImage*, *149*, 210–219. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.01.061

Liberman, N., & Trope, Y. (2008). The psychology of transcending the here and now. *Science*, *322*(5905), 1201–1205.

Liberman, N., & Trope, Y. (2014). Traversing psychological distance. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(7), 364–369.

Liesefeld, A. M., Liesefeld, H. R., & Zimmer, H. D. (2014). Intercommunication between prefrontal and posterior brain regions for protecting visual working memory from distractor interference. *Psychological Science*, *25*(2), 325–333. https://doi.org/10.1177/0956797613501170

Luck, S. J., & Vogel, E. K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(8), 391–400. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.006

Luria, R., Balaban, H., Awh, E., & Vogel, E. K. (2016). The contralateral delay activity as a neural measure of visual working memory. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *62*, 100–108. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.01.003

Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, *17*(3), 347–356. https://doi.org/10.1038/nn.3655

Mall, J. T., Morey, C. C., Wolff, M. J., & Lehnert, F. (2014). Visual selective attention is equally functional for individuals with low and high working memory capacity: Evidence from accuracy and eye movements. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *76*(7), 1998–2014. https://doi.org/10.3758/s13414-013-0610-2

Manza, P., Hau, C. L. V., & Leung, H. C. (2014). Alpha power gates relevant information during working memory updating. *Journal of Neuroscience*, *34*(17), 5998–6002. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4641-13.2014

McNab, F., & Klingberg, T. (2008). Prefrontal cortex and basal ganglia control access to working memory. *Nature Neuroscience*, *11*(1), 103–107. https://doi.org/10.1038/nn2024

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*(2), 81–97.

Moran, T. P. (2016). Anxiety and working memory capacity: A meta-analysis and narrative review. *Psychological Bulletin*, *142*(8), 831–864. https://doi.org/10.1037/bul0000051

Moriya, J., & Sugiura, Y. (2012). High visual working memory capacity in trait social anxiety. *PLoS ONE*, *7*(4), Article e0034244. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034244

Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *Journal of Physiology*, *527*(3), 633–639. https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x

O'luanaigh, C., O'connell, H., Chin, A. V., Hamilton, F., Coen, R., Walsh, C., & Lawlor, B. A. (2012). Loneliness and cognition in older people: the Dublin Healthy Ageing study. *Aging Ment Health*, *16*(3), 347–352.

Owens, M., Koster, E. H. W., & Derakshan, N. (2012). Impaired filtering of irrelevant information in dysphoria: An ERP study. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *7*(7), 752–763. https://doi.org/10.1093/scan/nsr050

Owens, M., Koster, E. H. W., & Derakshan, N. (2013). Improving attention control in dysphoria through cognitive training: Transfer effects on working memory capacity and filtering efficiency. *Psychophysiology*, *50*(3), 297–307. https://doi.org/10.1111/psyp.12010

Pashler, H. (1988). Familiarity and visual change detection. *Perception & Psychophysics*, *44*(4), 369–378.

Payer, D., Marshuetz, C., Sutton, B., Hebrank, A., Welsh, R. C., & Park, D. C. (2006). Decreased neural specialization in old adults on a working memory task. *NeuroReport*, *17*, 478–491.

Pessoa, L., Kastner, S., & Ungerleider, L. G. (2003). Neuroimaging studies of attention: From modulation of sensory processing to top-down control. *Journal of Neuroscience*, *23*(10), 3990–3998. https://doi.org/10.1523/jneurosci.23-10-03990.2003

Peverill, M., McLaughlin, K. A., Finn, A. S., & Sheridan, M. A. (2016). Working memory filtering continues to develop into late adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *18*, 78–88. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.02.004

Plebanek, D. J., & Sloutsky, V. M. (2019). Selective attention, filtering, and the development of working memory. *Developmental Science*, *22*(1), Article e12727. https://doi.org/10.1111/desc.12727

Pope, P. A., Brenton, J. W., & Miall, R. C. (2015). Task-specific facilitation of cognition by anodal transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex. *Cerebral Cortex*, *25*(11), 4551-4558.

Pratte, M. S., Park, Y. E., Rademaker, R. L., & Tong, F. (2017). Accounting for stimulus-specific variation in precision reveals a discrete capacity limit in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*(1), 6–17. https://doi.org/10.1037/xhp0000302

Qi, S., Ding, C., & Li, H. (2014). Neural correlates of inefficient filtering of emotionally neutral distractors from working memory in trait anxiety. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *14*(1), 253–265. https://doi.org/10.3758/s13415-013-0203-5

Rainer, G., Asaad, W. F., & Miller, E. K. (1998). Selective representation of relevant information by neurons in the primate prefrontal cortex. *Nature*, *393*(6685), 577-579.

Ress, D., Backus, B. T., & Heeger, D. J. (2000). Activity in primary visual cortex predicts performance in a visual detection task. *Nature Neuroscience*, *3*(9), 940–945.

Robison, M. K., McGuirk, W. P., & Unsworth, N. (2017). No evidence for enhancements to visual working memory with transcranial direct current stimulation to prefrontal or posterior parietal cortices. *Behavioral Neuroscience*, *131*(4), 277–288. https://doi.org/10.1037/bne0000202

Rouder, J. N., Morey, R. D., Morey, C. C., & Cowan, N. (2011). How to measure working memory capacity in the change detection paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*(2), 324–330.

Ruff, C. C. (2013). Sensory processing: Who's in top-down control? *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1296*, 88–107.

Sandrini, M., Rossini, P. M., & Miniussi, C. (2008). Lateralized contribution of prefrontal cortex in controlling task-irrelevant information during verbal and spatial working memory tasks: rTMS evidence. *Neuropsychologia*, *46*(7), 2056–2063. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.02.003

Schmicker, M., Schwefel, M., Vellage, A.-K., & Müller, N. G. (2016). Training of attentional filtering, but not of memory storage, enhances working memory efficiency by strengthening the neuronal gatekeeper network. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *28*(4), 636–642. https://doi.org/10.1162/jocn

Shipstead, Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2010). Does working memory training generalize? *Psychologica Belgica*, *50*(3), 245–276.

Spronk, M., Vogel, E. K., & Jonkman, L. M. (2012). Electrophysiological evidence for immature processing capacity and filtering in visuospatial working memory in adolescents. *PLoS ONE*, *7*(8), Article e0042262. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042262

Spronk, M., Vogel, E. K., & Jonkman, L. M. (2013). No behavioral or ERP evidence for a developmental lag in visual working memory capacity or filtering in adolescents and adults with ADHD. *PLoS ONE*, *8*(5), Article e0062673. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062673

Sternberg, N., Luria, R., & Sheppes, G. (2018). For whom is social-network usage associated with anxiety? The moderating role of neural working-memory filtering of Facebook information. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *18*(6), 1145–1158. https://doi.org/10.3758/s13415-018-0627-z

Stout, D. M., & Rokke, P. D. (2010). Components of working memory predict symptoms of distress. *Cognition and Emotion*, *24*(8), 1293–1303. https://doi.org/10.1080/02699930903309334

Stout, D. M., Shackman, A. J., Johnson, J. S., & Larson, C. L. (2015). Worry is associated with impaired gating of threat from working memory. *Emotion*, *15*(1), 6–11. https://doi.org/10.1037/emo0000015

Stout, D. M., Shackman, A. J., & Larson, C. L. (2013). Failure to filter: Anxious individuals show inefficient gating of threat from working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, Article 00058. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00058

Thiruchselvam, R., Hajcak, G., & Gross, J. J. (2012). Looking inward: Shifting attention within working memory representations alters emotional responses. *Psychological Science*, *23*(12), 1461–1466. https://doi.org/10.1177/0956797612449838

Tseng, P., Hsu, T. Y., Chang, C. F., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., Muggleton, N. G., … Juan, C. H. (2012). Unleashing potential: Transcranial direct current stimulation over the right posterior parietal cortex improves change detection in low-performing individuals. *Journal of Neuroscience*, *32*(31), 10554–10561. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0362-12.2012

van den Berg, R., Awh, E., & Ma, W. J. (2014). Factorial comparison of working memory models. *Psychological Review*, *121*(1), 124–149. https://doi.org/10.1037/a0035234

van den Berg, R., Shin, H., Chou, W. C., George, R., & Ma, W. J. (2012). Variability in encoding precision accounts for visual short-term memory limitations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(22), 8780–8785. https://doi.org/10.1073/pnas.1117465109

Vellage, A. K., Becke, A., Strumpf, H., Baier, B., Schönfeld, M. A., Hopf, J. M., & Müller, N. G. (2016). Filtering and storage working memory networks in younger and older age. *Brain and Behavior*, *6*(11), Article e00544. https://doi.org/10.1002/brb3.544

Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, *428*(6984), 748.

Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature*, *438*(7067), 500–503. https://doi.org/10.1038/nature04171

Wang, S., Itthipuripat, S., & Ku, Y. (2019). Electrical stimulation over human posterior parietal cortex selectively enhances the capacity of visual short-term memory. *Journal of Neuroscience*, *39*(3), 528–536. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1959-18.2018

Ward, R. T., Miskovich, T. A., Stout, D. M., Bennett, K. P., Lotfi, S., & Larson, C. L. (2019). Reward-related distracters and working memory filtering. *Psychophysiology*, *55*(10), Article e13402. https://doi.org/10.1111/psyp.13402

Wu, Y. J., Tseng, P., Chang, C. F., Pai, M. C., Hsu, K. S., Lin, C. C., & Juan, C. H. (2014). Modulating the interference effect on spatial working memory by applying transcranial direct current stimulation over the right dorsolateral prefrontal cortex. *Brain and cognition*, *91*, 87-94.

Xu, M., Qiao, L., Qi, S., Li, Z., Diao, L., Fan, L., … Yang, D. (2018). Social exclusion weakens storage capacity and attentional filtering ability in visual working memory. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *13*(1), 92–101. https://doi.org/10.1093/scan/nsx139

Ye, C., Hu, Z., Li, H., Ristaniemi, T., Liu, Q., & Liu, T. (2017). A two-phase model of resource allocation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *43*(10), 1557–1566. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.03.040

Ye, C., Sun, H. J., Xu, Q., Liang, T., Zhang, Y., & Liu, Q. (2019). Working memory capacity affects trade-off between quality and quantity only when stimulus exposure duration is sufficient: Evidence for the two-phase model. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-019-44998-3

Ye, C., Xu, Q., Liu, Q., Cong, F., Saariluoma, P., Ristaniemi, T., & Astikainen, P. (2018). The impact of visual working memory capacity on the filtering efficiency of emotional face distractors. *Biological Psychology*, *138*, 63–72. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.08.009

Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, *453*(7192), 233–235. https://doi.org/10.1038/nature06860

Zhou, J., Yin, J., Chen, T., Ding, X., Gao, Z., & Shen, M. (2011). Visual working memory capacity does not modulate the feature-based information filtering in visual working memory. *PLoS ONE*, *6*(9), Article e0023873. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023873

The Filtering Efficiency in Visual Working Memory

ZHANG Zhao[1,2], ZHANG Liwei[1], GONG Ran[1,3]

[1](School of Psychology, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

[2](Physical Education and Training of Third Department, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, China)

[3](College of Cabin Attendant, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The filtering efficiency is the mechanism to inhibit irrelevant items from entering visual working memory, studies have shown that it can be measured through working memory capacity or representation precision. The neural processes underlie filtering efficiency are presence of distractors, initiation of filtering, and filtering success/unnecessary storage, which are orchestrated by the prefrontal cortex and the basal ganglia, the posterior parietal cortex. The filtering efficiency's changing directions are affected by age, mental/neurological disorders, emotions, cognitive characteristics et al. Future studies should further clarify the relationship between filtering efficiency and working memory capacity, identify the mental process of filtering efficiency, explore the brain mechanism of filtering efficiency among various groups, and improve the ecological validity of experimental paradigms.

Keys words: filtering efficiency, visual working memory, neural mechanism, changing features